干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

基于CMB模型的巴丹吉林沙漠沙源区分析

宁　凯[1,2,3,4]，　王乃昂[3,4]，　李卓仑[3,4]，　杨振京[1,2]，
毕志伟[1,2]，　王奕心[3,4]，　王　攀[1,2]，　孙　杰[3,4]

（1. 中国地质科学院第四纪年代学与水文环境演变重点实验室，河北 石家庄　050061；2. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所，河北 石家庄　050061；3. 兰州大学资源环境学院，甘肃 兰州　730000；4. 兰州大学冰川与沙漠研究中心，甘肃 兰州　730000）

摘　要：沙漠因其高反照率、低比热容的下垫面以及粉尘高输出率的特征对全球和区域环境有重要的作用。作为具有高大沙山的第二大流动性沙漠，其物质来源一直是地球科学研究热点。通过对巴丹吉林沙漠及周边地区表层沉积物进行矿物分析，在此基础上对巴丹吉林沙漠的可能物源区进行分析，进一步利用化学质量平衡（CMB）模型探讨了各物源区对巴丹吉林沙漠的贡献率。结果表明：巴丹吉林沙漠的表层沉积物中主要矿物包括相对比较稳定钠长石、钙长石、歪长石、黑云母、斜顽辉石、透辉石、铁辉石、微斜长石、白云母、正长石、石英和榍石以及不具区域代表性的斜绿泥石、石膏、角闪石、方解石、岩盐；主要物源区包括沙漠湖积平原沙、洪积平原沙、现代湖泊沉积物、外源沙和岩石风化壳；其中岩石风化壳和现代湖泊沉积物属于就地起沙，基本只影响其周边区域，来自沙漠北部的冲洪积沙和来自沙漠西北的外源沙是沙漠的主要物源。这与中国东部沙漠以湖泊沉积就地起沙有明显不同，可能和沙漠的发育过程、地质历史时期湖泊退缩规模和气候环境状况有关。

关 键 词：矿物；风成沙；CMB模型；物源分析；巴丹吉林沙漠
文章编号：

世界干旱半干旱区占全球陆地表面三分之一。其中中国北方沙漠是亚洲东部甚至于北半球重要的沙尘源区[1-3]，对中国黄土的形成具有重要意义[4-6]。沙漠下垫面[7]和沙漠来源的大气粉尘[2,8-10]通过影响地表反照率[11]和大气辐射平衡[12-13]对区域[14]和全球[15]环境有显著的影响。而沙漠作为堆积地貌，本身又是区域沉积物和气候环境共同作用的产物，适当的气候环境和足够的沙源物质都是不可或缺的。不同沙漠的沙源有很大的不同，最流行的观点包括以外来物质为主要物源的“外地来沙说”和以沙漠周边基岩风化物、河湖相沉积物为主要物源的“就地起沙说”[16-17]。尽管各有相关论据支持，都取得了很大进步。但当前的沙漠物源研究方法上，主要还是依赖粒度、矿物、同位素的定性分析结果，对于定量化的沙漠物源研究依然较为欠缺。

巴丹吉林沙漠总面积5.2×10^4 km²，是中国第二大流动性沙漠[18-20]，沙山和高大山丘面积占沙漠面积一半以上[21]，最高沙丘可达400 m以上[21-22]，沙漠腹地发育巨厚的沙层沉积物[23]。对于巨厚的沙层来源，学者们利用不同的方法进行了一系列研究[24]。杨小平团队[25-28]通过地貌学、沉积学和沙粒微结构等方法对巴丹吉林沙漠沙粒的源区进行了探讨，暗示了地下基岩对沙漠形成的影响；Hu等[29]通过对新地貌和地球化学研究探讨了巴丹吉林沙漠物源，认为巴丹吉林的沙丘风成沙直接来自河流和湖泊沉积物，进一步通过对地球化学[29]和$\delta^{18}O$[16]

收稿日期：2020-05-13；　**修订日期：**2020-11-15
基金项目：中国地质科学院水文地质环境地质研究所基本科研业务费项目（SK202012）；中央高校基本科研业务费项目（lzujbky-2018-it82）和国家自然科学基金（41871021）资助
作者简介：宁凯（1989-），男，助理研究员，博士，研究方向为环境演变与现代过程. E-mail: care1909@hotmail.com
通讯作者：王乃昂（1961-），男，教授，博士，研究方向为气候变化与水循环. E-mail: wangna@lzu.edu.cn

分析认为巴丹吉林沙漠风成沙最初源头在祁连山；Mischke等[30]通过巴丹吉林沙漠边缘沙的粒度分析结合沙漠外围气候认为西北部的弱水河冲积扇是巴丹吉林沙漠风成沙最可能的沙源；李恩菊等[31]通过地球化学元素的分析认为巴丹吉林沙漠沉积物在矿物学上成熟度较低，可能属于近源沉积；宁凯等[32]通过对巴丹吉林沙漠表层沙的粒度和起沙分析认为巴丹吉林沙漠主要沙源区为沙漠北部的古湖泊及戈壁。但是由于沙漠腹地交通不便，缺少较为系统的样品采集和分析工作，并且缺乏定量或半定量的分析方法，故巴丹吉林沙漠沙源区及贡献率还存在一定争议。

物源分析在确定沉积物物源位置和性质及沉积物搬运路径，甚至整个盆地的沉积作用和构造演化等方面具有重要意义[33-37]。但目前的物源分析大多属于定性分析[36,38-39]，对于定量分析不同物源的贡献量研究还有所不足。化学质量平衡(CMB)模型是美国国家环境保护局最早推荐使用的一种受体模型(http://www.epa.gov/scram001/receptor_cmb.htm)，利用源和受体颗粒物化学组成的监测数据建立质量平衡模型以定量计算各污染源对环境中颗粒物浓度的贡献值。模型基于质量守恒，可定量评价源贡献率。自从Miller[40]在美国加州用CMB模型来计算气溶胶物源以后，就成为了大气环境研究中重要的源解析模型。被广泛应用到在美国[41-43]、欧洲[44]和中国[45-47]的$PM_{2.5}$和气溶胶的物源分析。逐渐被扩展应用于大气颗粒物PM_{10}[48]、有机碳、有机气溶胶、多环芳烃、河流污染物[49]、土壤污染物[50]、海洋表层沉积物多环芳烃[51]等的源解析研究中，具有极强的适用性。

本文通过对巴丹吉林沙漠及其周边沙样矿物进行CMB模型分析识别沙漠风成沙可能源区，进一步对巴丹吉林沙漠各沙源区贡献率进行定量探讨，对中国西北干旱区的风成沙和大气粉尘源区的研究具有一定科学意义。

1 研究区概况

巴丹吉林沙漠位于内蒙古阿拉善高原西部，其范围一般指弱水-额济纳河冲积扇戈壁以东、雅布赖山以西、北大山以北、中蒙边界以南的区域，地域范围位于39°04′15″~42°12′23″N，99°23′18″~104°34′02″E，面积为5.2 km²，为中国第二大沙漠[18]。沙漠南部主要为剥蚀山地，北部为干涸湖盆和戈壁，东侧为宗乃山和亚马雷克沙漠，西侧为古日乃湖现代干湖盆和戈壁(图1)。沙漠在全新世以来基本稳定，没有大规模扩张或收缩[52]。巴丹吉林沙漠广泛发育高大沙山，一般高150~300 m[16,22]，最高达到430 m[22]。研究区气候干旱，年降水量约为100 mm[53]，主要

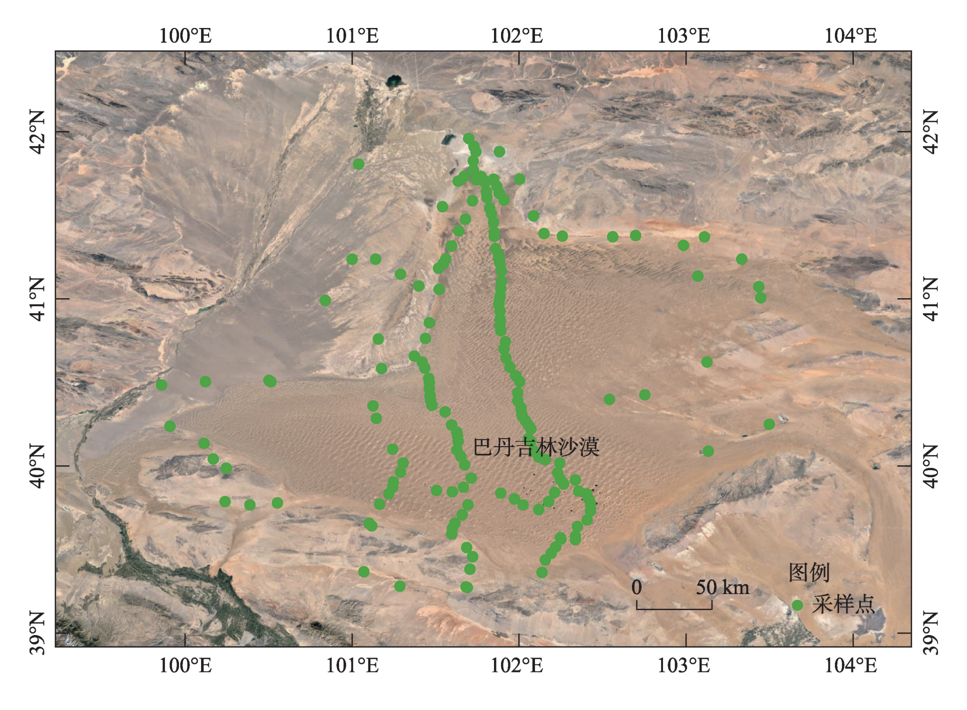


图1 研究区及采样位置示意图

Fig. 1 Samples distribution in Badain Jaran Desert

受W-NW大陆风系控制，沙丘走向多呈10°~40° NNE排列[27,54]。岩性上，沙漠南部剥蚀山地主要为基-酸性侵入岩，北部主要为古新生界湖相沉积物和古生界海相沉积岩，西侧主要为全新世湖相沉积物和更新统的冲洪积沙砾石，东侧主要为中新生界河湖相沉积岩和侵入岩[55-56]。

2 材料与方法

2.1 样品采集及实验分析

样品主要采集于巴丹吉林沙漠及其周边地区，风成沙主要采集于无植被覆盖的丘间地与平沙地，采样深度0~3 cm，共采集样品168个(图1)。岩石样品主要采集于沙漠北部和东北部的出露岩壳，共采集4组。样品经自然风干后，分别对其进行了矿物分析。矿物测定在兰州大学西部环境教育部重点实验室荷兰帕纳科公司生产的X'Pert Pro MPD型粉末X射线衍射仪进行，测量误差小于5%。

2.2 CMB模型

本文使用CMB模型进行源区贡献率分析。CMB模型的基本原理是质量守恒，即受体上每种化学组分的测量总浓度是所有源类贡献浓度值的线性加和[54]。设受体颗粒物上元素i上浓度为C_i，公式为：

$$C_i = \sum_{j=1}^{J} F_{ij} S_j \quad (1)$$

式中：C_i为受体大气颗粒中元素i的质量浓度测量值；F_{ij}为第j类元的颗粒物中元素i的质量分数；S_j为第j类源贡献的质量浓度计算值；J为类的数目，j=1, 2, …, J；I为元素的数目，i=1, 2, …, I，且$I \geq J$。

CMB模型要求排放源已知，源组分在传输过程中相对稳定，且无相互作用。模型的构建主要包括源类选取、元素选取、模型运行和模型评价四部分。源类选取采用了聚类分析进行分类的方法，元素选取主要根据矿物稳定性确定，模型评价主要根据模型自带的可信度模块进行。

3 结果与分析

3.1 矿物组合特征

矿物分析结果表明，主要矿物包括钠长石、钙长石、歪长石、黑云母、斜顽辉石、透辉石、铁辉石、微斜长石、白云母、正长石、石英、榍石、斜绿泥石、石膏、角闪石、方解石、岩盐(表1)，相对含量差别较大。其中长石、石英、白云母含量较高，方解石、岩盐、石膏等含量较低。而矿物含量的变化幅度上，岩盐、石膏、方解石变化非常大，石英、钙长石、钠长石、白云母等变化较小。榍石含量较小，变化幅度也较小。

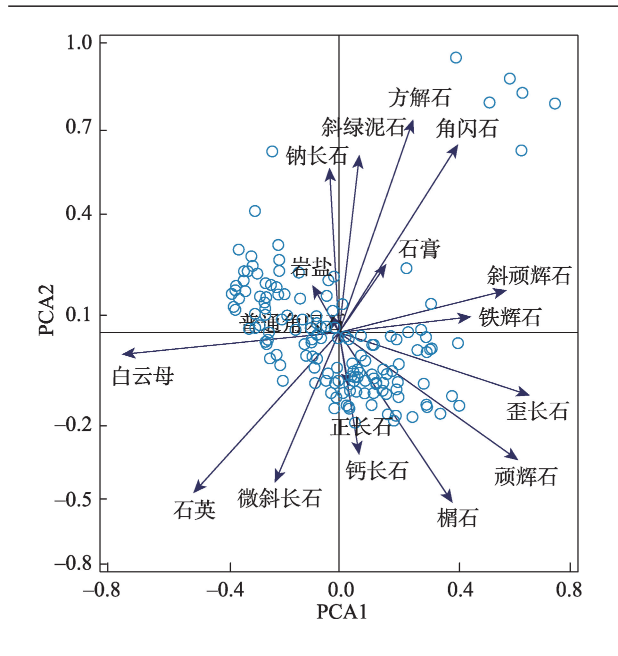
对巴丹吉林沙漠表层沙矿物组成矩阵做主成分分析(PCA)，最主要的2个主成分投影结果(图2)。第一主成分载荷投影图指示辉石和白云母呈现了负相关关系。一般来说，在搬运和风化过程中，辉石和角闪石的稳定性远不如石英和白云母。所以第一主成分可能指示表层沉积物的矿物成熟度，第一主成分越大表明成熟度越低，风化程度越低，搬运距离越近。第二主成分载荷投影图指示钠长石、斜绿泥石、方解石、角闪石分别和长石、石英、榍石表现出负相关的关系。一般来说方解石、绿泥石和石膏指示富含水的环境，石英和长石是常见的风成砂矿物，所以第二主成分指示了水力作用影响的湖积物、洪积物等对沙漠的贡献。第二主成分越大，湖积物、洪积物等的贡献越大。

对巴丹吉林沙漠表层沉积物矿物2个主成分得分进行反距离权重(IDW)空间插值后，发现其在空间分布上具有明显的规律(图3)。第一主成分得分在沙漠东西两侧的得分较低，矿物成熟度较低。在

表1 巴丹吉林沙漠及周边地区表层沙矿物组合特征

Tab. 1 Mineral assemblage characteristics of surface layer sand from Badain Jaran Desert and its adjacent area

矿物种类	石英	白云母	钙长石	微斜长石	顽辉石	钠长石	歪长石	正长石	斜绿泥石
平均值/%	29.23	18.22	11.21	9.49	8.34	8.25	3.28	2.76	1.99
标准差	13.39	14.83	5.07	7.86	8.30	6.14	4.35	5.92	3.92
变异系数	0.46	0.81	0.45	0.83	1.00	0.74	1.32	2.14	1.98
矿物种类	榍石	斜顽辉石	铁辉石	方解石	角闪石	石膏	普通角闪石	岩盐	总
平均值/%	1.93	1.82	1.56	0.98	0.41	0.31	0.10	0.07	5.88
标准差	2.18	3.11	3.12	4.22	1.66	1.95	0.49	0.53	9.98
变异系数	1.13	1.71	2.00	4.31	4.04	6.34	4.81	7.79	1.70



注:PCA1为第一主成分;PCA2为第二主成分。下同。

图2　巴丹吉林沙漠表层沉积物矿物结果主成分分析图

Fig. 2　Principal component plot of mineral results from Badain Jaran Desert surface sediment samples

沙漠腹地和沙漠北部得分较高,矿物成熟度越高。表明沙漠东西两侧的沉积物来自就地沉积,而沙漠腹地和沙漠北方的沉积物搬运距离较远,不属于就地搬运沉积。第二主成分得分在沙漠西北和北部的得分较高,沙漠腹地除东南部湖泊区外得分较低,表明沙漠西北和北部的湖积物和洪积物对沙漠沉积物有贡献,沙漠腹地的湖泊沉积物也对局地沉积物有一定影响。

3.2 不同矿物空间分布

不同矿物含量差异性比较显著。根据PCA分析结果和主要矿物含量,我们对主要代表性矿物进行了反距离权重空间插值分析(图4)。由图可知,巴丹吉林沙漠相较沙漠周边石英、榍石含量较高。白云母含量在沙漠中部和西部含量较高,沙漠北部和沙漠南部含量较低,沙漠东部最低。辉石含量在沙漠以西、沙漠北部和沙漠中部较低,其中沙漠中部最低,沙漠南部和沙漠以东较高。斜绿泥石含量在沙漠腹地湖泊区、沙漠西部、沙漠北部湖相沉积附近较高,受到较显著的湖泊沉积物影响。长石含量和斜绿泥石含量有一定相反关系,在湖泊影响区域较低,在沙漠南部、沙漠中部较高。

3.3 模型结果与检验

3.3.1 矿物种类选择及代表性　在物质运移过程中,不稳定的矿物容易破碎或者变质,变现为在不同组分中含量的差异。通过在沙漠的南部和北部分别选择具有代表性的样品对其不同的组分进行对比分析,选择在运移过程中较稳定的矿物,剔除在运移过程中不稳定的矿物。

随机选取了沙漠北部和沙漠南部的表层砂样品,分别分析测试了样品BY61(沙漠北部)、BY100和BY98(沙漠南部)不同组分及全样的矿物含量(表2)。由表可知,斜绿泥石、石膏、角闪石、方解石、岩盐只在极细砂组分中出现,而且其含量较少,而巴丹吉林沙漠主要以中细砂为主,在传输中不具有代表性和稳定性。而钠长石、钙长石、歪长石、黑云母、斜顽辉石、透辉石、铁辉石、微斜长石、白云母、正长石、石英和榍石相对比较稳定,而且可以作为分析矿物。

3.3.2 源类的选取　CMB模型要求源类确定,且源成分谱成分有明显差别,且各源类间无相互作用。为了选取有明显差别的源类,对沙漠所有样品进行了聚类分析。

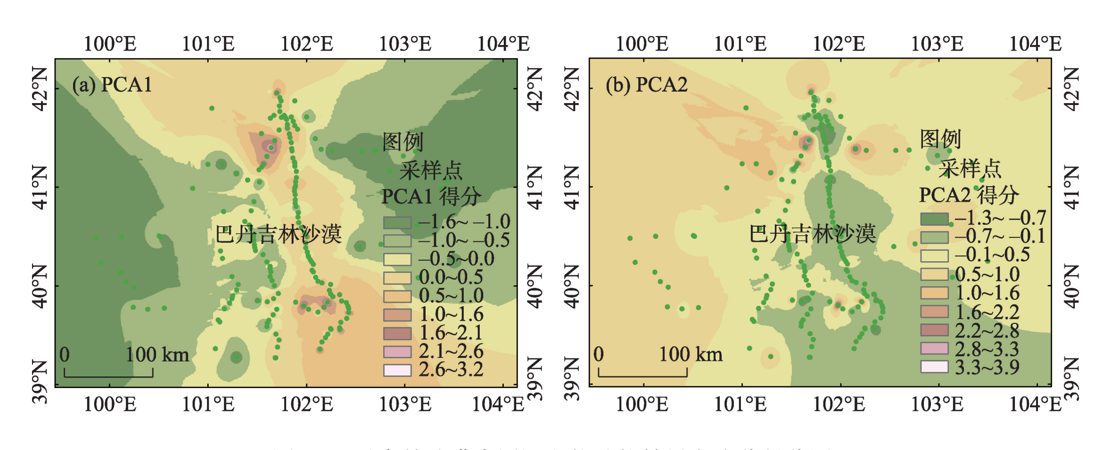


图3　巴丹吉林沙漠表层沉积物矿物结果主成分得分图

Fig. 3　Spatial distribution maps of principal component analysis scores on Badain Jaran Desert surface sediment mineral results

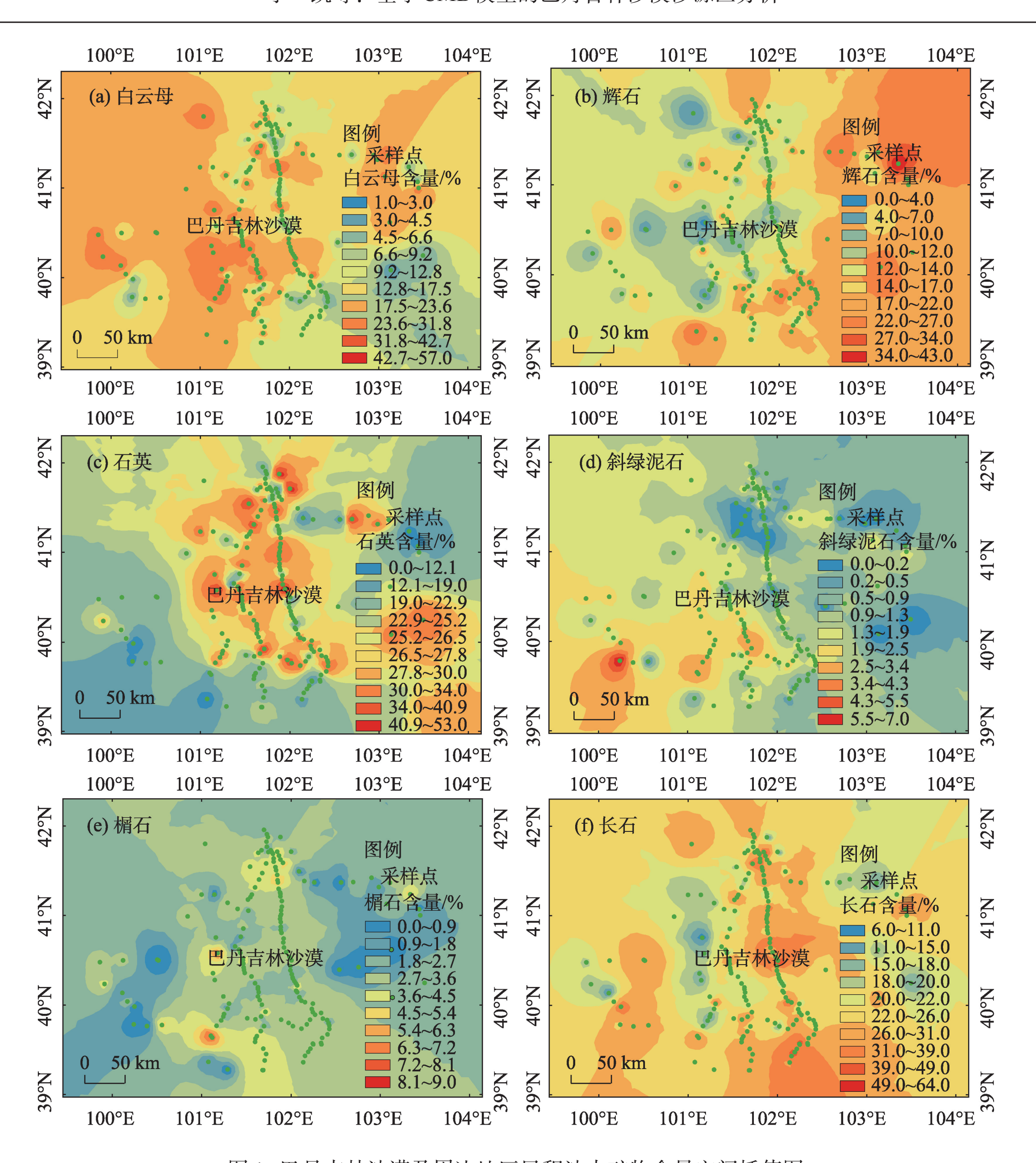


图4　巴丹吉林沙漠及周边地区风积沙中矿物含量空间插值图

Fig. 4　Spatial interpolation map of mineral content of Badain Jaran Desert aeolian sand

根据聚类分析结果，结合沙漠周边岩性[55]和地貌图[56]，确认湖积平原沙、洪积平原沙和湖泊沉积沙3种来源。为了确定外源物质对巴丹吉林沙漠的影响，依据矿物成熟度空间分布状况，结合聚类分析结果，确定了低成熟度的外源沙源类。为了确认沙漠附近火成岩对巴丹吉林沙漠可能的影响，添加沙漠南部花岗岩风化壳为一类源，初步确定此5类为巴丹吉林沙漠可能的源区。各个源类的类中心见表3。

3.3.3　模型结果　以岩石风化壳、湖积平原、洪积平原、湖泊沉积、外源沙为5个源类，选取受体沙的钠长石、钙长石、歪长石、黑云母、斜顽辉石、透辉石、铁辉石、微斜长石、白云母、正长石、石英和榍石为受体元素。把数据输入EPA-CMB 8.2[57]进行运算，结果见图5。冲洪积沙在沙漠北部和沙漠中部贡献度较高，在沙漠西部和沙漠南缘贡献度较低。湖积沙在沙漠北部古居延泽、沙漠西部古日乃湖附近贡献度较高，在沙漠腹地特别是沙漠东南部贡献度较低。外源沙在沙漠内部贡献度相对较高，特别是在沙漠北部和沙漠西部贡献度较高，在沙漠东南部贡献度较低。风化壳在沙漠东南缘和西部缘贡献度相对较高。现代湖泊沙主要在沙漠北部天鹅湖附近、沙漠腹地现代湖泊群周围、沙漠西部古日乃湖东侧贡献度较高。

表2 不同组分典型样品的矿物对比

Tab. 2 Comparison of mineral components of typical sample /%

矿物名称		石英	长石	白云母	辉石	黑云母	榍石	斜绿泥石	角闪石	方解石	石膏	岩盐
BY61	BY61粗沙	36	34	4	17	0	3	0	0	0	0	0
	BY61中沙	44	19	5	11	12	3	3	0	0	0	0
	BY61细沙	18	29	21	21	0	0	2	4	1	0	0
	BY61全样	26	27	20	18	2	3	0	0	0	0	0
BY98	BY98粗沙	50	10	5	22	6	4	0	0	0	0	0
	BY98细沙	26	20	2	31	9	4	0	0	1	0	0
	BY98极细沙	19	24	20	23	0	4	2	3	0	0	0
	BY98全样	25	33	3	24	0	5	1	0	0	0	0
BY100	BY100中沙	54	26	6	5	3	4	0	0	0	0	0
	BY100细沙	30	14	32	8	8	3	2	0	0	0	0
	BY100极细沙	30	23	23	9	0	0	3	4	2	0	0
	BY100全样	20	31	18	18	3	3	1	0	0	0	0

注:BY61为沙漠北部;BY100和BY98为沙漠南部。

表3 源类类中心

Tab. 3 Source class center /%

源类	矿物种类											
	钠长石	钙长石	歪长石	斜顽辉石	透辉石	顽辉石	铁辉石	微斜长石	白云母	正长石	石英	榍石
岩石风化壳	13.00	22.00	11.50	0.00	2.00	2.00	4.00	7.00	12.00	2.00	21.50	0.00
湖积平原	6.91	7.91	6.45	3.73	2.45	7.36	7.27	10.00	16.73	2.91	19.82	2.09
湖泊沉积	8.18	11.59	7.18	2.53	0.82	20.71	1.76	9.00	5.65	2.12	24.94	2.94
洪积平原	6.00	11.93	6.73	3.40	3.33	6.53	4.07	5.07	5.53	2.53	35.67	4.40
外源沙	5.57	7.78	4.61	2.83	1.65	5.35	3.43	6.17	27.43	3.13	25.96	2.26

3.3.4 模型可信度检验 对模型结果可信度的检验主要通过回归系数R^2和百分质量比%Mass进行检验，一般要求$R^2 \geq 0.8$或者80% < %Mass≤120%[40,46]。本次模型运算结果通过$R^2 \geq 0.8$的数据结果为150个,通过80% < %Mass≤120%的数据结果为159个,模型可信度较高。

4 讨论

4.1 巴丹吉林沙漠风积沙的物源

沙漠内部和沙漠周边表层沉积物的矿物组分在空间上具有连续变化的特征。较稳定的石英在沙漠中含量较高,符合风成沙普遍风化规律。沙漠北部高含量的石英含量暗示有不同的动力源。沙漠南缘和西南缘的石英含量较低暗示不同的物源,暗示沙漠以南的雅布赖山、北大山是沙漠南缘的物源区。沙漠以西和沙漠中部的较高含量的白云母,和中国地质调查局在金塔县北部的大红山白云母调查结果一致(见 http://geocloud.cgs.gov.cn/),暗示沙漠以西也是沙漠的物源区,且对沙漠中部影响较大。沙漠西部的高成熟度矿物特征不同于沙漠其他地区,暗示其不同的物源特征,结合白云母的空间分布特征,表明沙漠可能接受来自沙漠以西和沙漠西北地区的外源物质补给。斜绿泥石、方解石是区域性矿物,主要集中在沙漠腹地湖泊区、沙漠西南缘季节性积水区、沙漠西部和北缘的湖泊区,沙漠整体含量较低,暗示了当地现代湖泊和季节性洪水对沙漠的改造作用。这和主成分分析的结果是基本一致的。

CMB模型结果表明冲洪积沙对沙漠的整体贡献度较大,特别是对于沙漠的北部和东部贡献度较大;外源沙对沙漠的贡献率也较大,特别是对于沙漠西部和和沙漠的中南部贡献率最大;岩石风化壳对沙漠整体的贡献较小且影响范围也比较小,主要对沙漠边缘靠近剥蚀山地的地区有一定贡献;湖积沙对沙漠内部影响较小,主要对古湖泊及其周边地区影响较大。巴丹吉林沙漠主要的沙源为沙漠北部和北部的冲洪积物质和外源沙,岩石风化壳、现代湖泊沉积物、古湖泊沉积物主要影响其周边地

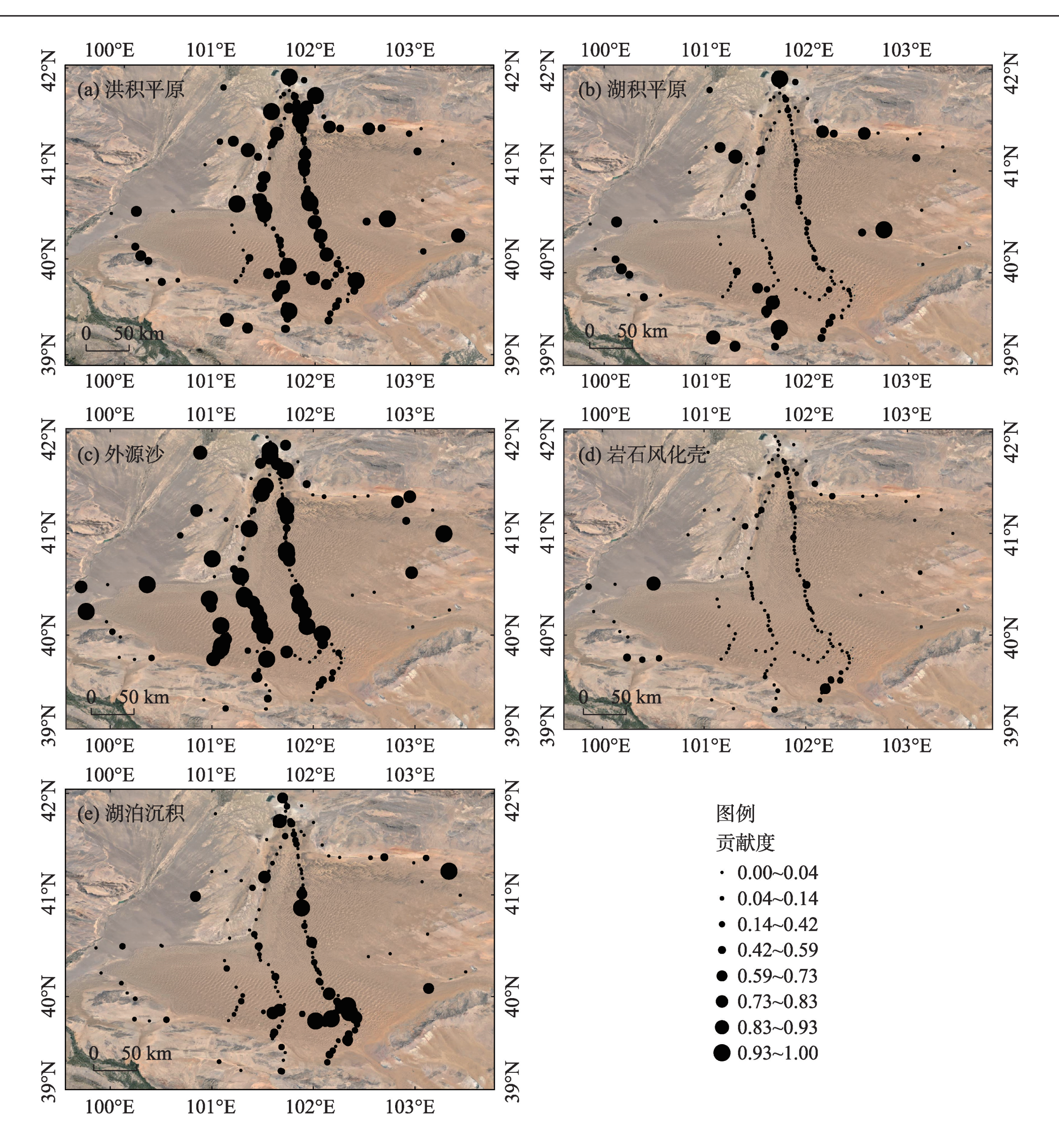


图5　各源类对沙漠不同地区贡献率图

Fig. 5　Contribution rate of each source to different areas of desert

区，对沙漠整体影响较为有限。巴丹吉林沙漠的沙源主要来自于沙漠的西部和北部，而沙漠南缘和西部地区可能受到局地的湖泊、风化壳影响。

在沙漠内部主要动力条件就是风力，输沙方向除沙漠南部是向北以外主要是向东南方向[27,58-59]，这与本文的风成沙的源区研究是一致的。本文的结果和Mischke等[30]关于沙漠源区可能是沙漠西北的弱水河冲积扇的结论也不矛盾，但因为Mischke文中采样范围主要在沙漠北部和东南部，在沙漠西部没有样品，忽略了可能的来自沙漠以西的物源。Hu等[29]通过新地貌和地球化学研究的结果分析认为，物质主要为沙漠北部的河流带来的，CMB模型中也发现冲洪积物为重要的沙源。但CMB模型结果中外源沙和湖积沙也是重要的沙源，这可能是由于Hu等[29]论文中样品主要采集于沙漠西北缘和东缘，而沙漠腹地、沙漠北部、沙漠南缘的样品没有进一步分析导致的。而李恩菊等[31]则通过元素分析后认为沙漠东南缘对沙漠贡献较小，这和CMB结果比较一致，但认为巴丹吉林沙漠是近源沉积，则和CMB模型结果有一定差别，这可能是由于李恩菊等[31]采样点位于沙漠腹地和沙漠东南缘、西缘，无法对沙漠北部和西北部的源区进行探讨导致的。在局部上，CMB模型的结果和前人的源区分析结果是不矛盾的，但因为采样位置和关注的尺度的差异，结果不完全一致。

CMB模型依赖于已知的源区，且源区之间不能

共线性。这在一定程度上限制了模型的适用性。但和传统上利用粒度、新地貌、地球化学和氧同位素定性的物源分析结果对比,CMB模型给出了定量的贡献度,模型本身可以检测是否遗漏重要源区,这对沙漠物源分析是重要的,对于沉积物的源区示踪具有较强适用性和应用前景。

4.2 与其他沙漠对比

中国东部沙漠例如乌兰布和沙漠、毛乌素沙漠、浑善达克沙地、科尔沁沙地等,在全新世最适宜期沙漠甚至一度完全消失[52],而后受到强烈气候变化和人类活动影响而出现大规模的沙漠扩张。巴丹吉林沙漠在全新世的沙漠边界基本稳定[52],这保证了巴丹吉林沙漠较为稳定的物源。环境的强烈变化与否也导致中国东西部沙漠的物源模式的不同。在毛乌素沙漠东部[60]、乌兰布和沙漠[61]、浑善达克沙地[62]在地质历史时期有大面积湖泊,湖泊干涸后可以提供大量的沙源物质,这些东部沙地主要物源是当地的湖泊沉积物。以巴丹吉林沙漠为代表的西部沙漠面积更大,物源也更加复杂,当地的湖泊面积往往较小,随气候变化可以暴露出的干涸湖泊沉积物比较有限,难以作为主要的沙源,往往只能产生局地影响。而冲洪积物和邻近地区外源沙成为巴丹吉林沙漠、准噶尔盆地沙漠[63]、塔克拉玛干沙漠[64]的重要物源。在面积更大、物源更复杂的塔克拉玛干沙漠,冰川退缩后冰碛物[64-65]成为了沙漠的重要物源。中国北方沙漠整体上,气候从东到西气候逐渐干旱,古湖泊扩张收缩的强度逐渐减弱,湖泊沉积能提供的物源减少,冲洪积物提供的比重增加,沙漠源区也逐渐由就地到近源再到更远距离的冰川搬运。这和中国北方沙漠的气候条件、发育时期和动力条件驱动状况是一致的。

5 结 论

本文通过对巴丹吉林沙漠168个表层风成沙进行矿物分析,据此进行了主要矿物的空间分析和物源模型运算,探讨了巴丹吉林沙漠的主要物源及其贡献度,得到以下结论:

(1) 沙漠腹地湖盆对沉积物改造较为有限,沙漠周边地区的岩石风化壳只能影响近缘地区,不是沙漠的主要物源。

(2) 沙漠西部的高成熟度矿物特征不同于沙漠其他地区,沙漠以北的冲洪积物对沙漠北部和中部贡献很大,表明沙漠砂主要来自于沙漠以西和西北方向。

(3) 巴丹吉林沙漠物源不同于中国东部沙地的湖泊沉积就地起沙的模式,巴丹吉林沙漠表层沉积物更多来自沙漠周边地区的近源搬运。

(4) CMB模型相对于传统方法更易定量化,不会丢失关键源,适用于干旱区粗颗粒物质的物源分析。

致谢:感谢兰州大学历次巴丹吉林沙漠科学考察队队员的卓越贡献和帮助扶持。

参考文献(References)

[1] 高会旺, 祁建华, 石金辉, 等. 亚洲沙尘的远距离输送及对海洋生态系统的影响[J]. 地球科学进展, 2009, 24(1): 1-10. [Gao Huiwang, Qi Jianhua, Shi Jinhui, et al. Lang-range transport of Asian dust and its effects on ocean ecosystem[J]. Advances in Earth Science, 2009, 24(1): 1-10.]

[2] 张小曳, 张光宇, 朱光华, 等. 中国源区粉尘的元素示踪[J]. 中国科学(D辑), 1996, 26(5): 423-430. [Zhang Xiaoye, Zhang Guangyu, Zhu Guanghua, et al. Element tracing of dust in source areas of China[J]. Scientia Sinica Terrae, 1996, 26(5): 423-430.]

[3] 陈洪云, 孙有斌. 黄土高原风尘沉积的物质来源研究: 回顾与展望[J]. 第四纪研究, 2008, 28(5): 892-901. [Chen Hongyun, Sun Youbin. Study on provenance of eolian dust deposits on the Chinese Loess Plateau: Retrospects and prospects[J]. Quaternary Sciences, 2008, 28(5): 892-901.]

[4] 刘东生. 中国的黄土堆积[M]. 北京: 科学出版社, 1965. [Liu Dongsheng. Loess accumulation in China[M]. Beijing: Science Press, 1965.]

[5] Sun Y, Tada R, Chen J, et al. Distinguishing the sources of Asian dust based on electron spin resonance signal intensity and crystallinity of quartz[J]. Atmospheric Environment, 2007, 41(38): 8537-8548.

[6] Che X, Li G. Binary sources of loess on the Chinese Loess Plateau revealed by U-Pb ages of zircon[J]. Quaternary Research, 2017, 80(3): 545-551.

[7] 吴锦奎, 王杰, 丁永建, 等. 干旱区农田、草地和荒漠下垫面辐射收支平衡的对比分析[J]. 高原气象, 2010, 29(3): 103-112. [Wu Jinkui, Wang Jie, Ding Yongjian, et al. Contrastive study on radiation budget in cropland, grassland and desert in arid area of northwest China[J]. Plateau Meteorology, 2010, 29(3): 103-112.]

[8] 徐瑞红, 武发思, 汪万福, 等. 敦煌莫高窟大气可吸入颗粒物的化学元素特征[J]. 干旱区地理, 2020, 43(5): 1231-1241. [Xu Ruihong, Wu Fasi, Wang Wanfu, et al. Chemical elemental characteristics of atmospheric inhalable particulates in Dunhuang Mogao Grottoes[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(5): 1231-1241.]

[9] 帕丽达·牙合甫, 杨鹏月. 乌鲁木齐市近几年大气颗粒物中重金属的浓度特征[J]. 干旱区地理, 2019, 42(3): 492-498. [Yahefu Palida, Yang Pengyue. Concentration characteristics of heavy metals in the atmospheric particles in Urumqi City in recent years[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(3): 492-498.]

[10] 张亚茹, 陈永金, 刘永芳, 等. 沙尘影响下华北地区一次重污染

天气形成与消散过程分析[J]. 干旱区地理, 2018, 41(6): 1241-1250. [Zhang Yaru, Chen Yongjin, Liu Yongfang, et al. Formation and dissipation processes of a severe atmospheric pollution in north China under the influence of dust[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(6): 1241-1250.]

[11] El-Metwally M, Korany M, Boraiy M, et al. Evidence of anthropization of aerosols in the Saharan and peri-Saharan regions: Implications for the atmospheric transfer of solar radiation[J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2020, 199: 1-10.

[12] 田磊, 张武, 常倬林, 等. 河西走廊干旱区春季沙尘气溶胶对辐射的影响初步研究[J]. 干旱区地理, 2018, 41(5): 923-929. [Tian Lei, Zhang Wu, Chang Zhuolin, et al. Influence of spring dust aerosol on radiation over the arid area in Hexi Corridor[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(5): 923-929.]

[13] Xin J, Gong C, Wang S, et al. Aerosol direct radiative forcing in desert and semi-desert regions of northwestern China[J]. Atmospheric Research, 2016, 171: 56-65.

[14] 霍文, 金莉莉, 王团团, 等. 沙漠陆面过程与沙漠小气候研究进展[J]. 沙漠与绿洲气象, 2016, 10(5): 87-96. [Huo Wen, Jin Lili, Wang Nannan, et al. Review on the desert land surface process and regional climate effect[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2016, 10(5): 87-96.]

[15] Zhang X Y, Arimoto R, An Z S. Dust emission from Chinese desert sources linked to variations in atmospheric circulation[J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102(23): 28041-28047.

[16] 朱震达, 吴正. 中国沙漠概论[M]. 北京: 科学出版社, 1980. [Zhu Zhenda, Wu Zheng. Introduction to deserts in China[M]. Beijing: Science Press, 1980.]

[17] 付旭东, 王岩松. 中国沙漠物源研究: 回顾与展望[J]. 沉积学报, 2015, 33(6): 1063-1073. [Fu Xudong, Wang Yansong. Provenance studies of Chinese deserts: Review and outlook[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2015, 33(6): 1063-1073.]

[18] 朱金峰, 王乃昂, 陈红宝, 等. 基于遥感的巴丹吉林沙漠范围与面积分析[J]. 地理科学进展, 2010, 29(9): 1087-1094. [Zhu Jinfeng, Wang Naiang, Chen Hongbao, et al. Study on the boundary and the area of Badain Jaran Desert based on remote sensing imagery[J]. Progress in Geography, 2010, 29(9): 1087-1094.]

[19] 张振瑜, 王乃昂, 马宁, 等. 近40a巴丹吉林沙漠腹地湖泊面积变化及其影响因素[J]. 中国沙漠, 2012, 32(6): 1743-1750. [Zhang Zhenyu, Wang Naiang, Ma Ning, et al. Lakes area change in Badain Jaran Desert hinterland and its influence factors during the recent 40 years[J]. Journal of Desert Research, 2012, 32(6): 1743-1750.]

[20] 张华安, 王乃昂, 李卓仑, 等. 巴丹吉林沙漠东南部湖泊和地下水的氢氧同位素特征[J]. 中国沙漠, 2011, 31(6): 1623-1629. [Zhang Hua'an, Wang Naiang, Li Zhuolun, et al. Features of hydrogen and oxygen isotopes in lakes and groundwater in southeast Badain Jaran Desert[J]. Journal of Desert Research, 2011, 31(6): 1623-1629.]

[21] Chen J S, Li L, Wang J Y, et al. Water resources: Groundwater maintains dune landscape[J]. Nature, 2004, 432(7016): 459-460.

[22] 白旸, 王乃昂, 何瑞霞, 等. 巴丹吉林沙漠湖相沉积的探地雷达图像及光释光年代学证据[J]. 中国沙漠, 2011, 31(4): 842-846. [Bai Yang, Wang Naiang , He Ruixia, et al. Ground penetrating radar images and optically stimulated luminescence dating for lacustrine deposition of the Badain Jaran Desert[J]. Journal of Desert Research, 2011, 31(4): 842-846.]

[23] Wang F, Sun D, Chen F, et al. Formation and evolution of the Badain Jaran Desert, north China, as revealed by a drill core from the desert centre and by geological survey[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2015, 426: 139-158.

[24] Dong Z, Qian G, Lyu P, et al. Investigation of the sand sea with the tallest dunes on Earth: China's Badain Jaran Sand Sea[J]. Earth-Science Reviews, 2013, 120: 20-39.

[25] 杨小平. 巴丹吉林沙漠及其毗邻地区的景观类型及其形成机制初探[J]. 中国沙漠, 2000, 20(2): 166-172. [Yang Xiaoping. Landscape types and its formation mechanism in the Badain Jaran Desert and its surrounding areas[J]. Journal of Desert Research, 2000, 20(2): 166-172.]

[26] Yang X P. Landscape evolution and precipitation changes in the Badain Jaran Desert during the last 30000 years[J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(11): 1042-1047.

[27] 刘陶, 杨小平, 董巨峰, 等. 巴丹吉林沙漠沙丘形态与风动力关系的初步研究[J]. 中国沙漠, 2010, 30(6): 1285-1291. [Liu Tao, Yang Xiaoping, Dong Jufeng, et al. A preliminary study of relation between megadune shape and wind regime in the Badain Jaran Desert[J]. Journal of Desert Research, 2010, 30(6): 1285-1291.]

[28] Yang X P, Scuderi L, Liu T, et al. Formation of the highest sand dunes on Earth[J]. Geomorphology, 2011, 135(1-2): 108-116.

[29] Hu F X, Yang X P. Geochemical and geomorphological evidence for the provenance of aeolian deposits in the Badain Jaran Desert, northwestern China[J]. Quaternary Science Reviews, 2016, 131: 179-192.

[30] Mischke S. 内蒙古巴丹吉林沙漠成因的粒度分析和热发光测年新证据[J]. 古地理学报, 2005, 7(1): 1779-1797. [Mischke S. New evidence for origin of Badain Jaran Desert of Inner Mongolia from granulometry and thermoluminescence dating[J]. Journal of Palaeogeography, 2005, 7(1): 1779-1797.]

[31] 李恩菊, 董治宝. 巴丹吉林沙漠沉积物的地球化学特征[J]. 河南科学, 2014, 32(8): 1565-1570. [Li Enju, Dong Zhibao. Geochemical characteristics of sediments in Badain Jaran Desert[J]. Henan Science, 2014, 32(8): 1565-1570.]

[32] 宁凯, 李卓仑, 王乃昂, 等. 巴丹吉林沙漠地表风积砂粒度空间分布及其环境意义[J]. 中国沙漠, 2013, 33(3): 642-648. [Ning Kai, Li Zhuolun, Wang Naiang, et al. Spatial characteristics of grain size and its environmental implication in the Badain Jaran Desert[J]. Journal of Desert Research, 2013 33(3): 642-648.]

[33] 徐田武, 宋海强, 况昊, 等. 物源分析方法的综合运用——以苏北盆地高邮凹陷泰一段地层为例[J]. 地球学报, 2009, 30(1): 111-118. [Xu Tianwu, Song Haiqiang, Kuang Hao, et al. Synthetic application of the provenance analysis technique: A case study of member 1 of Taizhou formation in Gaoyou Sag, Subei Basin[J]. Acta Geoentica Sinica, 2009, 30(1): 111-118.]

[34] 赵红格, 刘池洋. 物源分析方法及研究进展[J]. 沉积学报, 2003,

21(3): 409−415. [Zhao Hongge, Liu Chiyang. Approaches and prospects of provenance analysis[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2003, 21(3): 409−415.]

[35] 徐志伟, 汪亚平, 李炎, 等. 多元统计及物源分析支持的北部湾东部海域沉积物输运趋势[J]. 海洋学报, 2010, 32(3): 67−78. [Xu Zhiwei, Wang Yaping, Li Yan, et al. Sediment transport patterns in the eastern Beibu Gulf based on grain size multivariate statistics and provenance analysis[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2010, 32(3): 67−78.]

[36] 汪正江, 陈洪德, 张锦泉. 物源分析的研究与展望[J]. 沉积与特提斯地质, 2000, 20(4): 104−110. [Wang Zhengjiang, Chen Hongde, Zhang Jinquan. Research and prospect of source analysis[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2000, 20(4): 104−110.]

[37] 王昕梅, 张智, 凌超豪, 等. 鄱阳湖西南缘的历史近源风成堆积的粒度特征[J]. 干旱区地理, 2019, 42(1): 29−37. [Wang Xinmei, Zhang Zhi, Ling Chaohao, et al. Grain size characteristic of regional sand-dust accumulation system in southwest of Poyang Lake[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(1): 29−37.]

[38] 徐亚军, 杜远生, 杨江海. 沉积物物源分析研究进展[J]. 地质科技情报, 2007, 26(3): 26−32. [Xu Yajun, Du Yuansheng, Yang Jianghai. Prospects of sediment provenance analysis[J]. Geological Science and Technology Information, 2007, 26(3): 26−32.]

[39] 金秉福, 林振宏, 季福武. 海洋沉积环境和物源的元素地球化学记录释读[J]. 海洋科学进展, 2003, 21(1): 99−106. [Jin Bingfu, Lin Zhenhong, Ji Fuwu. Interpretation of element geochemical records of marine sedimentary environment and provenance[J]. Advances in Marine Science, 2003, 21(1): 99−106.]

[40] Miller M S, Friedlander S K, Hidy G M. A chemical element balance for the Pasadena aerosol[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1972, 39(1): 165−176.

[41] Watson J G, Chow J C, Lu Z Q, et al. Chemical mass-balance source apportionment of PM_{10} during the Southern California air-quality study[J]. Aerosol Science and Technology, 1994, 21(1): 1−36.

[42] Watson J G, Chow J C, Fujita E M. Review of volatile organic compound source apportionment by chemical mass balance[J]. Atmospheric Environment, 2001, 35(9): 1567−1584.

[43] Watson J G, Chow J C. Source characterization of major emission sources in the Imperial and Mexicali Valleys along the US/Mexico border[J]. The Science of the Total Environment, 2001, 276(1−3): 33−47.

[44] Schmidl C, Marr L L, Caseiro A, et al. Chemical characterization of fine particle emissions from wood stove combustion of common woods growing in mid-European Alpine regions[J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(1): 126−141.

[45] Zheng M, Salmon L G, Schauer J J, et al. Seasonal trends in $PM_{2.5}$ source contributions in Beijing, China[J]. Atmospheric Environment, 2005, 39(22): 3967−3976.

[46] 孙敬敏. 污染源成分谱分析及CMB应用研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2011. [Sun Jingmin. Analysis of pollution source component spectrum and application of CMB[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2011.]

[47] Cheng N, Zhang C, Jing D, et al. An integrated chemical mass balance and source emission inventory model for the source apportionment of $PM_{2.5}$ in typical coastal areas[J]. Journal of Environmental Sciences China, 2020, 92: 118−128.

[48] Chow J C, Watson J G, Lowenthal D H, et al. PM_{10} source apportionment in California San-Joaquin Valley[J]. Atmospheric Environment Part a−General Topics, 1992, 26(18): 3335−3354.

[49] 王在峰, 张水燕, 张怀成, 等. 水质模型与CMB相耦合的河流污染源源解析技术[J]. 环境工程, 2015, 33(2): 135−139. [Wang Zaifeng, Zhang Shuiyan, Zhang Huaicheng, et al. Source apportionment technology of river pollution source by water quality model coupling with CMB model[J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2015, 33(2): 135−139.]

[50] 张长波, 骆永明, 吴龙华. 土壤污染物源解析方法及其应用研究进展[J]. 土壤, 2007, 39(2): 190−195. [Zhang Changbo, Luo Yongming, Wu Longhua. Methods for source apportionment of soil pollutants and their advances in application to soil environmental research[J]. Soils, 2007, 39(2): 190−195.]

[51] 郎印海, 薛荔栋, 刘爱霞, 等. 日照近岸海域表层沉积物中多环芳烃(PAHs)来源的识别和解析[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2009, 39(3): 535−542. [Lang Yinhai, Xue Lidong, Liu Aixia, et al. Identification and source spportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in coastal surface sediments from Rizhao offshore area[J]. Periodical of Ocean University of China, 2009, 39(3): 535−542.]

[52] Lu H, Yi S, Xu Z, et al. Chinese deserts and sand fields in Last Glacial maximum and Holocene optimum[J]. Chinese Sci Bull, 2013, 58(23): 2775−2783.

[53] 王乃昂, 马宁, 陈红宝, 等. 巴丹吉林沙漠腹地降水特征的初步分析[J]. 水科学进展, 2013, 24(2): 153−160. [Wang Naiang, Ma Ning, Chen Hongbao, et al. Preliminary study for the precipitation characteristics in the hinterland of Badain Jaran Desert[J]. Advances in Water Science, 2013, 24(2): 153−160.]

[54] 钱广强, 董治宝, 罗万银, 等. 巴丹吉林沙漠地表沉积物粒度特征及区域差异[J]. 中国沙漠, 2011, 31(6): 1357−1364. [Qian Guangqiang, Dong Zhibao, Luo Wanyin, et al. Grain size characteristics and spatial variation of surface sediments in the Badain Jaran Desert[J]. Journal of Desert Research, 2011, 31(6): 1357−1364.]

[55] 李恩菊. 巴丹吉林沙漠与腾格里沙漠沉积物特征的对比研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2011. [Li Enju. A comparative study of sediment characteristics between Badain Jaran Desert and Tengger Desert[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2011.]

[56] 陆锦华, Yeckel D. 巴丹吉林沙漠及邻近地区地貌图[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1998. [Lu Jinhua, Yeckel D. Geomorphic map of Badain Jaran Desert and its adjacent areas[M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 1998.]

[57] Coulter C T, Wagoner R A, Lewis C W. EPA−CMB8. 2 users manual[M]. NC: Research Triangle Park, 2004.

[58] 闫满存, 王光谦, 李保生, 等. 巴丹吉林沙漠高大沙山的形成发育研究[J]. 地理学报, 2001, 56(1): 83−91. [Yan Mancun, Wang

Guangqian, Li Baosheng, et al. Formation and growth of high megadunes in Badain Jaran Desert[J]. Acta Geographica Sinica, 2001, 56(1): 83−91.]

[59] 闫满存, 王光谦, 李保生, 等. 巴丹吉林沙漠更新世古风向变化及环境意义[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2001, 41(11): 118−122. [Yan Mancun, Wang Guangqian, Li Baosheng, et al. Pleistocene paleowind direction change in the Badain Jaran Desert and its environmental significance[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2001, 41(11): 118−122.]

[60] Liu Q, Yang X P. Geochemical composition and provenance of aeolian sands in the Ordos Deserts, northern China[J]. Geomorphology, 2018, 318: 354−374.

[61] Zhang C, Li Z L, Chen Q, et al. Provenance of eolian sands in the Ulan Buh Desert, northwestern China, revealed by heavy mineral assemblages[J]. Catena, 2020, 193: 1−14.

[62] Liu Z, Yang X P. Geochemical-geomorphological evidence for the provenance of aeolian sands and sedimentary environments in the Hunshandake Sandy Land, eastern Inner Mongolia, China[J]. Acta Geologica Sinica-English Edition, 2013, 87(3): 871−884.

[63] 钱亦兵, 周兴佳, 李崇舜, 等. 准噶尔盆地沙漠沙矿物组成的多源性[J]. 中国沙漠, 2001, 21(2): 182−187. [Qian Yibing, Zhou Xingjia, Li Chongshun, et al. Multi-sources of sand minerals for the deserts in the Jungger Basin[J]. Journal of Desert Research, 2001, 21(2): 182−187.]

[64] Yang X P, Zhu B, White P D. Provenance of aeolian sediment in the Taklamakan Desert of western China, inferred from REE and major-elemental data[J]. Quaternary International, 2007, 175: 71−85.

[65] 潘仁义, 李川川, 张梅, 等. 天山冰川与塔克拉玛干风沙沉积的颗粒特征和分异过程分析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2012, 48(5): 744−756. [Pan Renyi, Li Chuanchuan, Zhang Mei, et al. Analysis of particle characteristics and differentiation processes of glacial sediment in Tianshan and eolian sediment in the Taklimakan Desert[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2012, 48(5): 744−756.]

Analysis of sand source for Badain Jaran Desert based on CMB model

NING Kai[1,2,3,4], WANG Naiang[3,4], LI Zhuolun[3,4], YANG Zhenjing[1,2], BI Zhiwei[1,2], WANG Yixin[3,4], WANG Pan[1,2], SUN Jie[3,4]

(1. Key Laboratory of Quaternary Chronology and Hydro-Environmental Evolution, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, Hebei, China; 2. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, Hebei, China; 3. College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China; 4. Research Center for Glacier and Desert, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: Desert ecosystems play an important role in global and regional environments due to their high albedo, low specific heat capacity, and high dust output. As the second largest mobile desert in China, the source of sediment in the Badain Jaran Desert has always been a subject of interest in earth science research. In this paper, the composition of surface sediments collected from the Badain Jaran Desert and surrounding areas were analyzed to identify their provenance, and the chemical mass balance model was used to estimate the contribution rates of source or sources. The results show that the main minerals in the surface sediments of the Badain Jaran Desert include relatively stable albite, albite, anorthite, anorthoclase, biotite, clinoenstatite, enstatite, microcline, muscovite, orthoclase, quartz, titanite, and non-regionally representative clinochlore, gypsum, hornblende, calcite, and halite, and the main provenances include desert lacustrine plain sands, alluvial plain sands, modern lake sediments, exogenous sands, and weathered rock crusts. The weathered rock crusts and modern lake sediments belong to in situ sanding and thus only affects the surrounding area. Alluvial sand from north of the desert and exogenous sand from the northwest are the main sources of the Badain Jaran Desert sands. These are very different from the desert sediments in the eastern parts of China which are attributed to lake sedimentation and may be related to the evolution of the desert, the scale of retreat of lakes in the region throughout geological history, and the climate and environmental conditions.

Key words: minerals; aeolian sand; CMB model; provenance analysis; Badain Jaran Desert